

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

Herausgeber:	Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
Redaktion:	Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten Andrea Schneider Fakultät für Maschinenbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges, Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer, Dipl.-Ing. Silke Stauche
Redaktionsschluss: (CD-Rom-Ausgabe)	31. August 2005
Technische Realisierung: (CD-Rom-Ausgabe)	Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau Dipl.-Ing. Christian Weigel Dipl.-Ing. Helge Drumm Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Technische Realisierung: (Online-Ausgabe)	Universitätsbibliothek Ilmenau ilmedia Postfach 10 05 65 98684 Ilmenau
Verlag:	 Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V. Werner-von-Siemens-Str. 16 98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe):	3-932633-98-9	(978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe):	3-932633-99-7	(978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

R. Bergmann, C. Kremin, A. Albrecht, T. Frank

Strukturbildung beim Mikro-Sandstrahlen mit Maskierung

KURZFASSUNG

Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse von Untersuchungen zu grundlegenden Effekten bei der Strukturbildung des Mikro-Sandstrahlens mit maskiertem Substrat dar. Es werden die Abhängigkeiten zwischen der Abtragstiefe und den Parametern Strahldruck, Strahlmittelbeladung sowie der Strukturöffnung aufgezeigt und Besonderheiten der Strukturierung dargestellt.

EINLEITUNG

Das Mikro-Sandstrahlen hat bei der Strukturierung von sprödbrechenden Materialien wie Glas, Silizium oder Keramik in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen [1]. Es stellt eine schnelle und preiswerte Alternative gegenüber bestehenden Techniken dar und ermöglicht die Fertigung 3-dimensionaler Strukturen mit Auflösungen bis zu $300\text{ }\mu\text{m}$ und einer Flankensteilheit von bis zu 85° . Dies ermöglicht auch einen Einsatz bei mikrotechnisch gefertigten Bauteilen. Prinzipiell gibt es dabei zwei Formen der Strukturierung. Die „serielle“ Methode der gezielten Strahlführung über das Substrat und die „parallele“ Methode der Strukturierung unter Zuhilfenahme von überwiegend metallischen Maskierungsschichten. Der abrasive Sandstrahl wird in diesem Anwendungsfall flächendeckend über das maskierte Substrat geführt. In den Experimenten wurde zur Vereinfachung ein feststehender, auf einen Punkt fokussierter Strahl verwendet, um die Versuchsfelder in Borosilikatglas zu strukturieren, Bild 1.

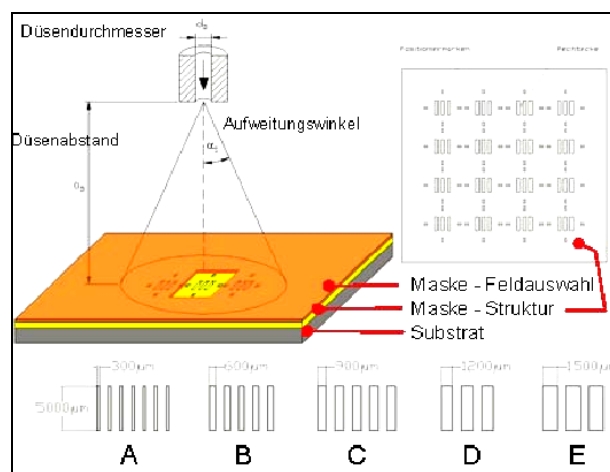


Bild1: Anordnung und Maskierung beim Mikro-Sandstrahlen und Strukturdimensionen der Teststrukturen

Durch die Art der Düse, welche im Abstand von 100 mm vom Substrat angebracht war, liegt je nach Strahldruck eine Aufweitung des Strahls αS von bis zu 12° vor, wie sie in [1] beschrieben wird. (Bild1) Durch die geringe laterale Ausdehnung der jeweiligen Teststruktur im Mittelpunkt konnte im Testbereich jedoch eine konstante, senkrechte Strahlmittelfuhr angenommen werden. Durch eine entsprechend einstellbare Vorrichtung wurde zudem eine konstante Strahlmittelbeladung des Druckluftstrahles sichergestellt.

EINFLÜSSE AUF DIE STRUKTURTIEFE UND ABTRAGSRATE

Die erreichbare Strukturtiefe ist begrenzt und hängt von den verschiedenen Parametern des Strahlprozesses ab. Bei den durchgeführten Experimenten wurde hierzu eine rechteckige Maskenöffnung mit verschiedenen Öffnungsbreiten verwendet. (Bild 1) Weiterhin wurde der Zusammenhang zwischen Abtragsrate und zunehmender Strahltiefe ermittelt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Folgenden dargestellt.

Strukturbreite

Bild 2 zeigt den Einfluss der Breite der Maskenöffnung auf die Strukturtiefe. Bei breiteren Geometrien ist eine tiefere Strukturierung möglich, was auf eine größere freie Weglänge der Körner im Inneren der Struktur zurückzuführen ist. Bei einem maskierten Glaswafer unendlicher Dicke würde die Funktion des Abtrags gegen einen konstanten Wert streben, da die Abtragsenergie des Strahls ab einer bestimmten Tiefe nicht mehr ausreicht, um weiteres Material abzutragen. Die Strahlmittelkörner verlieren aufgrund von Kollisionen in den zunehmend enger werdenden Strukturen die nötige Energie. Es kommt zu einer Art Verstopfung der Struktur, da teilweise auch das Strahlgut die Struktur nicht mehr verlassen kann.

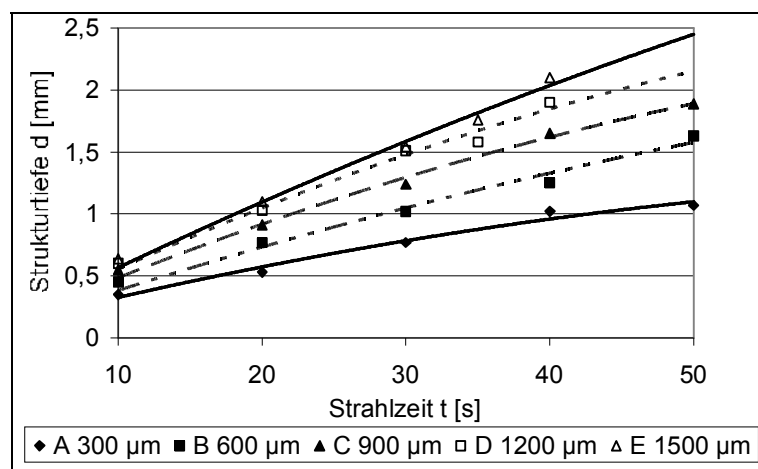


Bild 2: Einfluss der Stukturbreite (A-E) auf die Strukturtiefe

Bild 3 stellt die Ableitung der Abtragsfunktion dar, welche für eine unendliche Strahlzeit gegen Null strebt. Für die verwendeten konstanten Parameter Strahl Druck und Strahlmittelbeladung existiert eine maximale Abtragsrate für unmaskiertes Substrat. Bei weiterer Strukturvergrößerung nähert sich die Abtragsratenfunktion dem Verlauf der Abtragsrate für unmaskiertes Substrat an. Darauf deutet auch die Verringerung der Abstände zwischen den dargestellten Kurven von A bis E hin. Eine Grenze für die kleinste zu realisierende Strukturbreite wird durch die Korngröße des verwendeten Strahlmittels vorgegeben.

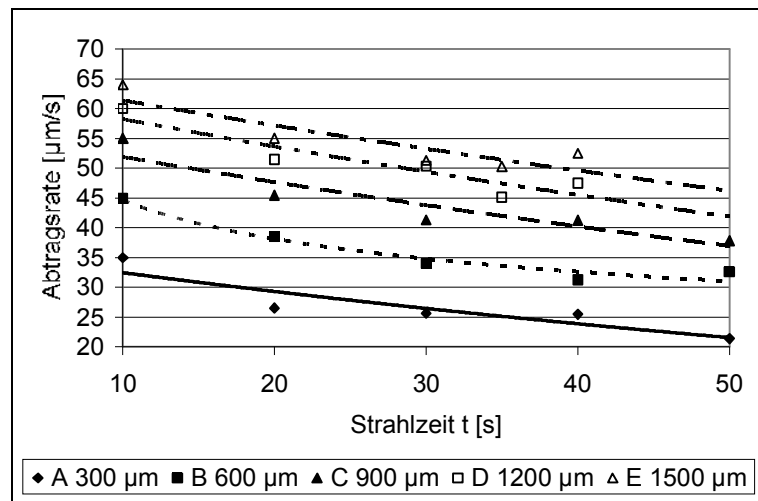


Bild 3: Einfluss der Stukturbreite (A-E) auf die Abtragsrate

Strahl Druck

In Bild 4 ist die Abtragsrate bei konstanter Strahlmittelbeladung für die Strukturöffnung C (900µm) bei steigendem Strahl Druck aufgezeigt.

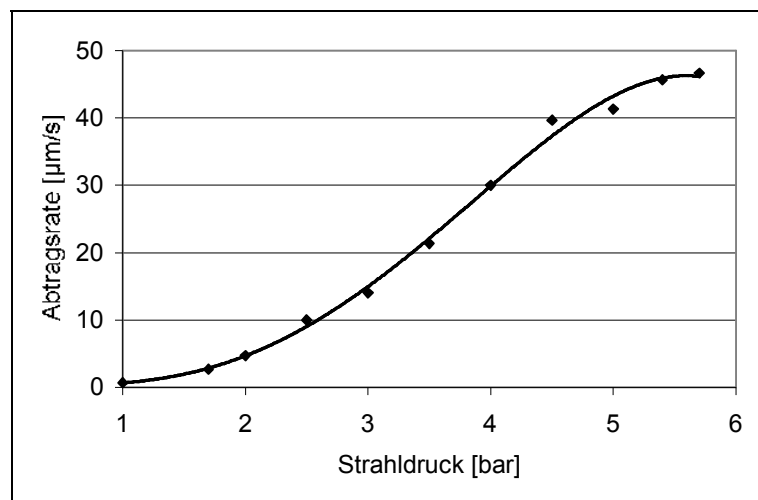


Bild 4: Einfluss des Strahl Druckes auf die Abtragsrate

Die Kurve kann in drei Abschnitte geteilt werden. Zuerst ein nichtlinearer Anstieg der Kurve zwischen 0 und 2,5 bar. Darauf folgt ein nahezu linearer Kurvenverlauf bis zum Erreichen eines Strahl Druckes von 5 bar. Im dritten Bereich tritt eine Sättigung der Funktion ab 5 bar ein. Die

Ursache für den nichtlinearen ersten Abschnitt liegt in der Tatsache, dass die für den Abtragsprozess ausschlaggebende kinetische Energie der Strahlkörner hier quadratisch von der Strömungsgeschwindigkeit der Luft abhängt. Bei zylindrischen Düsen, wie sie für diese Arbeit verwendet wurden, kommt es bis zu einem Verhältnis von Speisedruck zu Umgebungsdruck von $p_s < 1,9 p_0$ zu einer nicht-linearen Erhöhung der Geschwindigkeit der Luft und der Strahlkörner. Danach strömt die Luft annähernd mit Schallgeschwindigkeit aus und eine weitere Erhöhung des Speisedruckes bewirkt keine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit des Trägermediums. Die kinetische Energie wird im zweiten Teil der Kurve durch die Erhöhung der Dichte des Trägermediums bei Druckerhöhung und folglich einer Zunahme der Luftreibung bzw. der Geschwindigkeit der Strahlmittelkörner erreicht. [1], [2]. Die Krümmung bzw. Sättigung der Kurve im dritten Abschnitt ist zum einen auf das Erreichen der Maximalgeschwindigkeit der Körner und zum anderen auf zunehmende Druckverluste innerhalb der verwendeten Strahlanlage und der damit verbundenen Abweichung zwischen eingestelltem und tatsächlichem Strahldruck zurückzuführen.

Strahlmittelbeladung

In Bild 5 ist die Abtragsrate für verschiedene Strahlmittelbeladungen bei jeweils gleicher Strahlzeit dargestellt. Im Gegensatz zum Strahlprozess mit unmaskiertem Substrat [1] besitzt die Funktion der Abtragsrate keinen linearen Verlauf. Diese Abweichung lässt sich durch den Einfluss der Maskierung erklären. Theoretisch sollte ein lineares Verhältnis zwischen Strahlmittelbeladung und Abtragstiefe bzw. Abtragsrate bestehen, welches jedoch durch den zunehmenden Einfluss größerer Strahltiefen und der damit verbundenen Verringerung der freien Weglänge des Korns verändert wird. Dieser Effekt verstärkt sich bei längerer Strahlzeit durch die daraus resultierenden höheren Abtragstiefen.

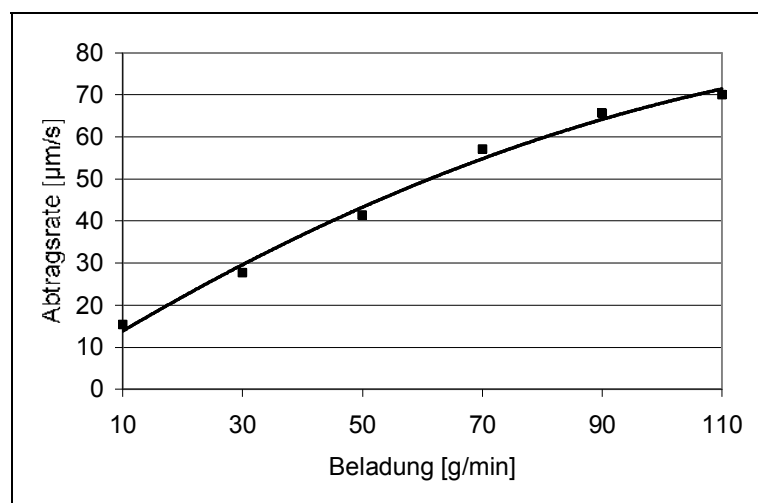


Bild 5: Einfluss der Strahlmittelbeladung auf die Abtragsrate

BESONDERHEITEN BEI DER STRUKTURBILDUNG

Bei der Ausbildung der Struktur traten unerwartete Eigenarten in der Geometrie der „Löcher“ auf. Auffallend war:

- eine Verjüngung der Strukturbreite in einer bestimmten Tiefe
- eine horizontale Abwanderung der Struktur mit zunehmender Tiefe
- die Aufweitung der Ein- und Austrittsöffnung

Verjüngung

In Bild 6 ist der Verlauf der Strukturausbildung im Querschnitt dargestellt. Wie die Untersuchungen ergaben, tritt der Effekt der Verjüngung der Struktur, abhängig von der Breite der Maskenöffnung, erst ab einer bestimmten Strahltiefe auf. Je breiter die Struktur, desto tiefer kann gestrahlt werden, bevor die Verjüngung eintritt. Das Verhältnis zwischen Eintrittsöffnungsbreite und Tiefe an der Stelle der Strukturverjüngung ist bei Beginn der Ausbildung der Verjüngung nahezu konstant. Es schwankt je nach Strahldruck und Strahlmittelbeladung zwischen 1,3 und 1,7.

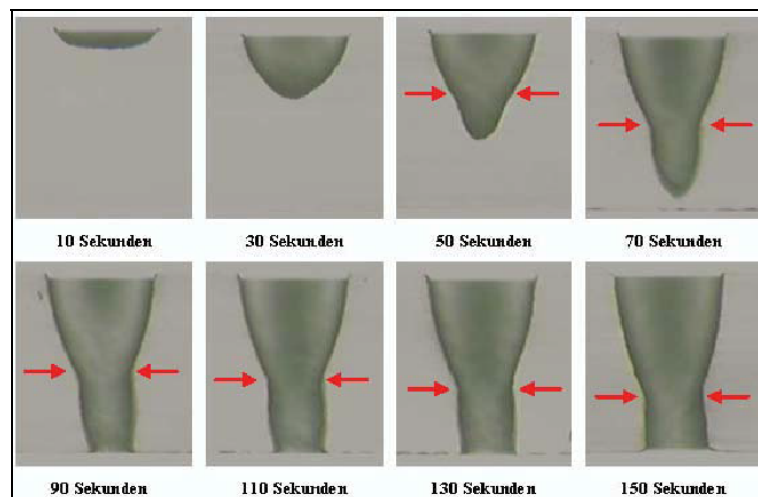


Bild 6: Querschnitt -Verlauf der Strukturbildung

Der Grund für die Verjüngung liegt in der Winkelabhängigkeit des Abtragsprozesses. Der maximale Abtrag wird nur bei senkrechtem Auftreffen des Strahlguts auf die Substratoberfläche erreicht. Durch die Ausbildung einer Krümmung in der gestrahlten Struktur auf Grund der Maskierung kommt es zu einem veränderten Auftreffwinkel der Körner auf dem Substrat. Eine abschätzende Modellierung des Profils unter Berücksichtigung des sich ändernden Auftreffwinkels ergab die in Bild 7 dargestellten Verläufe.

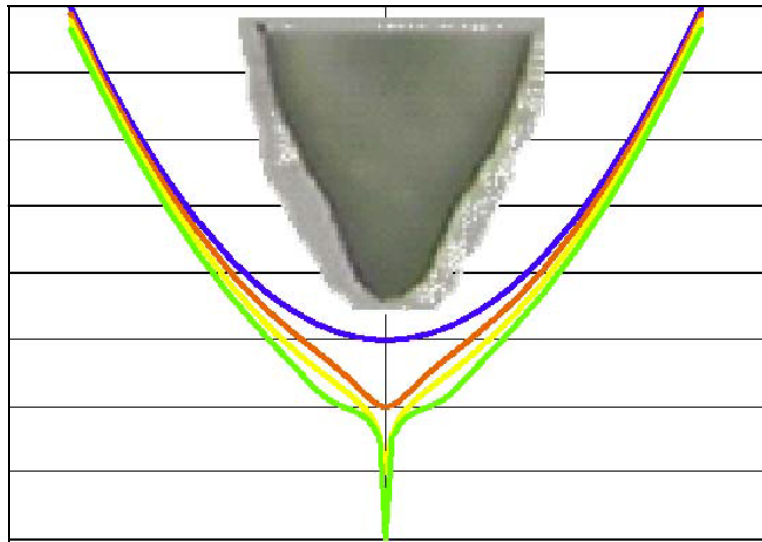


Bild 7: Modell - Abtragsprofil unter Berücksichtigung des sich durch den Abtragsprozess ändernden Auftreffwinkels des Strahlgutes

Für eine sinnvolle Strukturierung ist eine beidseitige Maskierung und Bestrahlung von großem Vorteil. In Bild 8 ist das Prinzip dieser Technik dargestellt.

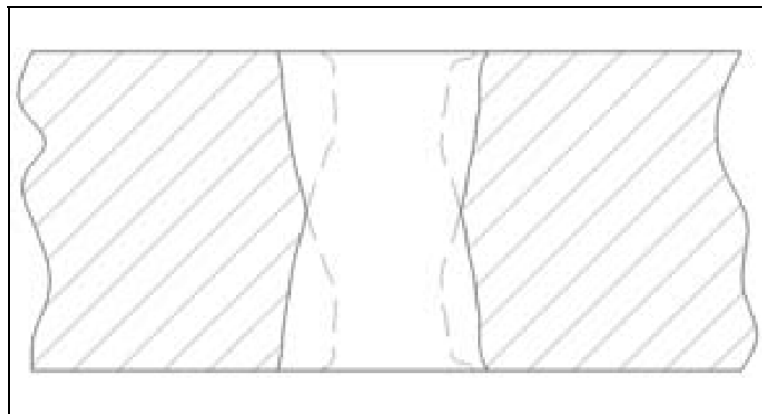


Bild 8: Prinzip der beidseitig maskierten und bestrahlten Bearbeitung

Abwanderung der Struktur

Bei der Betrachtung der Strahlergebnisse fiel eine Abwanderung der Struktur aus der Mittelachse des idealen Verlaufs auf. Diese Abwanderung ist bei geringen Strukturbreiten ab 600 μm besonders ausgeprägt, Bild 9. Es konnte festgestellt werden, dass dieser Effekt zunimmt je weiter man sich von dem zentralen Auftreffpunkt des Korns entfernt. Diese Abwanderung ist jedoch nicht vollständig durch die Aufweitung des Abtragsstrahls und der damit verbundenen Änderung des Auftreffwinkels der Körner auf dem Substrat zu erklären. Für die dargestellte Struktur ergibt sich theoretisch eine Winkeldifferenz von 2° zwischen mittlerer und äußerster Struktur. Die gemessene Abwanderung beträgt jedoch ca. 10° .

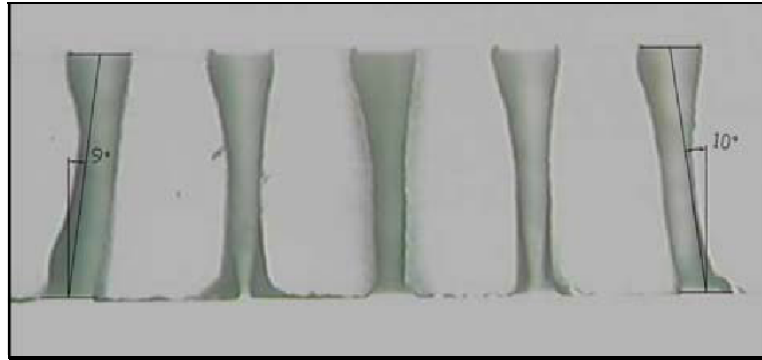


Bild 9: Abwandern der Struktur

Weiterhin konnte eine Verstärkung des Effekts mit zunehmender Tiefe der Struktur festgestellt werden, da ein bereits bestehender unsymmetrischer Strukturverlauf die Körner ablenkt. Es ist jedoch erst bei einem Aspektverhältnis von $> 1,3$ mit einer deutlichen Abwanderung der Struktur zu rechnen.

Aufweitung der Struktur

Bei der Untersuchung der Strahlergebnisse fiel eine Aufweitung der erzeugten Geometrien auf. Zu erkennen war eine Strukturverbreiterung an der Eintrittsöffnung durch:

- Materialabtrag an den Strukturkanten der Maske
 - Maskenverformung durch Druckeinwirkung der Strahlmittelkörner
- sowie eine Verbreiterung der Austrittsöffnung durch:
- Rückprallende Körner vom Substraträger und
 - seitlich hinter den Glaswafer einströmenden Körner

Bild 10 zeigt ein Beispiel für die Verbreiterung der Austrittsöffnung welche zu einer qualitativen Verschlechterung der erzeugten Geometrie führt. Ein Vermeiden dieses Effektes ist durch das Schaffen einer „Auslaufstrecke“ für die Körner möglich, z.B. durch einen ringförmigen Substraträger.

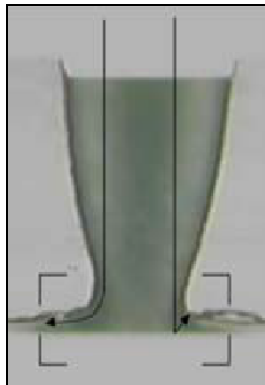


Bild10: Aufweitung der Austrittsöffnung

Für die Problematik der Aufweitung der Eintrittsöffnung spielt die im Querschnitt der verwendeten, geätzten Maskengeometrie auftretende Nabe, Bild 11, eine entscheidende Rolle. Sie stellt eine Schwachstelle der schützenden Funktion der Maske dar. Auf Grund ihrer filigranen Struktur, wird sie während des Strahlprozesses besonders bei hohen Strahlmittelbeladungen und Strahldrücken schnell abgetragen.

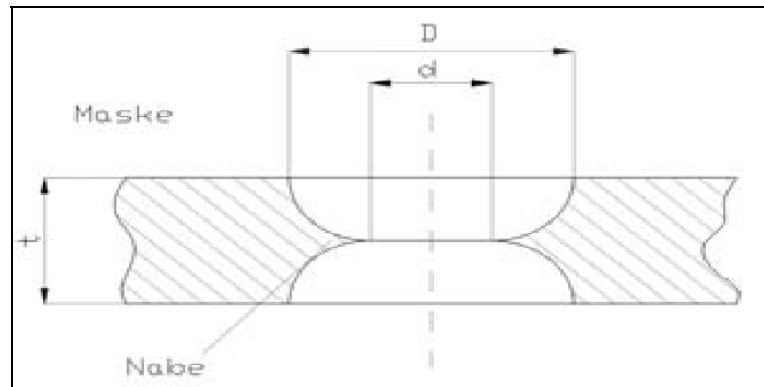


Bild 11: Querschnitt Maskierung mit Nabe

Um die Größenordnung der Aufweitung der Eintrittsöffnung aufzuzeigen, sind in Bild 12 die Öffnungsbreite der Maske an der Stelle der Nabe d , die Öffnungsbreite an der Oberfläche der Maske D , sowie die tatsächlich erreichte aufgeweitete Öffnungsbreite von Maske und Substrat nach dem Strahlprozess d_{gest} für die unterschiedlichen Designmaße A-E gegenübergestellt.

Bei normalen Strahlparametern war eine Angleichung von gestrahlter Breite und Breite der Öffnung an der Maskenoberseite festzustellen. Bei extremen Parametern (hoher Druck, hohe Beladung) war das erzeugte d_{gest} in jedem Fall größer als die Breite der Strukturöffnung an der Oberseite der ungestrahlten Maske D . Dies deutet darauf hin, dass bei großen Strahlmittelbeladungen und Strahldrücken der Maskenabtrag nicht allein auf die Nabe begrenzt ist.

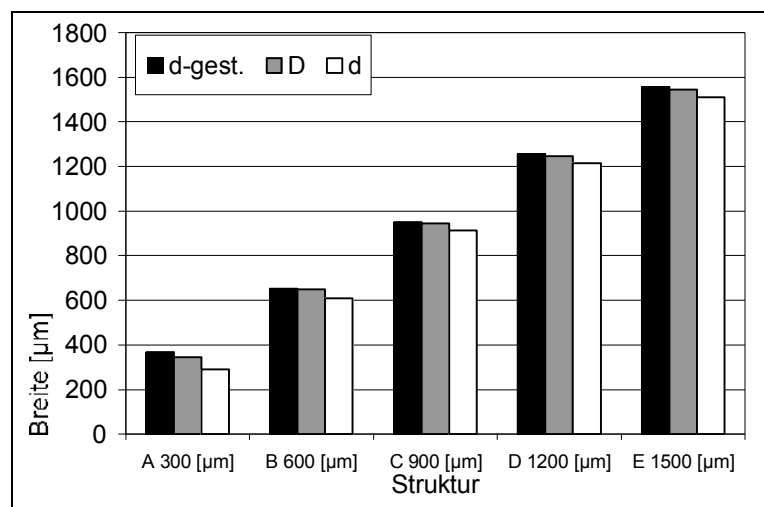


Bild 12: Breite der Maskenöffnung vor und nach dem Strahldurchgang

Eine mögliche Ursache für das bereits beschriebene Abwandern der Struktur könnte ein ungleichmäßiger Nabenabtrag sein. Die entstandene unsymmetrische Maskenöffnung unterstützt ein unsymmetrisches Ausbilden der Struktur.

ZUSAMMENFASSUNG

In vorliegendem Beitrag wurden grundlegende Effekte bei der Ausbildung von kleinsten Strukturen durch den Prozess des Mikro-Sandstrahlens aufgezeigt und ihre Ursachen dargelegt. Der Einfluss der Parameter Strukturbreite, Strahldruck und Strahlmittelbeladung auf die Strukturtiefe konnte gezeigt sowie Besonderheiten bei der Strukturbildung herausgestellt werden. Insbesondere der Effekt der Verjüngung und der Abwanderung von Strukturen mit zunehmender Strukturtiefe wurde analysiert. Zudem wurde der Einfluss der Maskierung auf das Strahlergebnis in Form der Aufweitung der Eintrittsöffnung einer Struktur verdeutlicht.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Bothen, Martin:
Mikro – Abrasives – Druckluftstrahlen zum Abtragen sprödbrechender Materialien der Mikrosystemtechnik.
1. Auflage. Berlin: Dr. Köster Verlag, 2000.
- [2] Mende, D.; Simon, G.:
Physik. Grundgleichungen und Tabellen.
10. Auflage. Leipzig: Fachbuchverlag, 1988

Autorenangabe(n):

Dipl.-Ing. René Bergmann
Dipl.-Ing. Christoph Kremin
Dr. Ing. Arne Albrecht
Dr. Ing. Thomas Frank
ZMN, Tu-Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Str. 7
98693 Ilmenau
Tel.: +49 3677-693425
Fax: +49 3677-693360
E-mail: christoph.kremin@tu-ilmenau.de